

В.В. ЕПИФАНОВ, канд. техн. наук, **Р.В. ПРОТАСОВ** (г. Харьков)

АПРОКСИМАЦИЯ ХАРАКТЕРИСТИК ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ УСТАНОВОК ТРАНСПОРТНЫХ СРЕДСТВ

Наведено результати апроксимації зовнішніх швидкісних характеристик дизельних двигунів, що використовуються на швидкохідних гусеничних та повнопривідних колісних машинах.

External speed characteristics of diesel engines are used on high-speed tracted and full-drive wheeled vehicles are presented.

При исследовании тягово-динамических свойств транспортных средств одним из важных факторов является представление внешних скоростных характеристик энергетических установок.

В данной работе поставлена задача аппроксимации характеристик дизельных двигателей быстроходных гусеничных и полноприводных колесных машин (ГКМ) с учетом объектовых потерь мощности.

Безрегуляторную (корректорную) ветвь внешней скоростной характеристики дизеля обычно представляют следующими аналитическими зависимостями [1,2,3]:

$$N_e = N_{e_{\max}} \left[a_\omega \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right) + b_\omega \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 - c_\omega \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^3 \right]; \quad (1)$$

$$M_e = \frac{N_e}{\omega}; \quad (2)$$

$$g_e = g_{eN} \left[a_g + b_g \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right) + c_g \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2 \right], \quad (3)$$

где N_e , M_e и g_e – соответственно эффективные мощность, крутящий момент и удельный эффективный расход топлива при угловой скорости вала дизеля ω ; $N_{e_{\max}}$ – максимальная эффективная мощность; g_{eN} – удельный эффективный расход топлива в режиме максимальной мощности; ω_N – угловая скорость при максимальной мощности; a_ω , b_ω и c_ω – постоянные для конкретного дизеля коэффициенты; ориентировочно $a_g = 1,55$, $b_g = -1,55$, $c_g = 1$.

Коэффициенты a_ω , b_ω и c_ω , которые по сути являются аппроксимационными, можно найти [4,5] по координатам характерных точек: $N_{e_{\max}}$, ω_N и $M_{e_{\max}}$, ω_{M_e} (максимальный эффективный крутящий момент и соответ-

вующая угловая скорость), обычно приводимых в технических характеристиках двигателя:

$$a_{\omega} = \frac{1 - k_{M_e} k_{\omega_e} (2 - k_{\omega_e})}{1 - k_{\omega_e} (2 - k_{\omega_e})}; \quad (4)$$

$$\dots b_{\omega} = \frac{2(1 - a_{\omega})}{2 - k_{\omega_e}}; \quad (5)$$

$$\dots c_{\omega} = a_{\omega} + b_{\omega} - 1, \quad (6)$$

где $k_{\omega_e} = \omega_N / \omega_{M_e}$ – коэффициент приспособляемости двигателя по угловой скорости (эффективный); $k_{M_e} = M_{e_{\max}} / M_{e_N}$ (M_{e_N} – эффективный крутящий момент при максимальной мощности) – коэффициент приспособляемости двигателя по эффективному крутящему моменту.

Скоростная характеристика двигателя обычно снимается на испытательном стенде при постороннем источнике охлаждения, а также без воздухоочистителя и глушителя. Если при этом вентилятор системы охлаждения и работает, то потребляемая им мощность значительно меньше, чем в действительных условиях на ГКМ. Это объясняется большим сопротивлением реальных воздушных трактов (впускных и выпускных), особенно на специальных машинах, где корпус герметизируется, а воздухопритоки и отводы защищают от повреждений и попадания посторонних предметов. Поэтому необходимо учитывать дополнительные (объектовые) потери мощности при работе двигателя на ГКМ в составе моторной (силовой) установки – в системах дизеля: охлаждения, питания воздухом и выпуска отработанных газов, а также на привод масляных насосов, генератора и т.д. Эти потери в основном зависят от угловой скорости вала двигателя и их мощность можно оценить так [6,7]:

$$\Delta N = a_{\Delta} \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^{a_N} \cdot N_{e_{\max}}, \quad (7)$$

где a_{Δ} – коэффициент потерь: $a_{\Delta} = 0,12 \dots 0,16$ – для вентиляторной системы охлаждения и $a_{\Delta} = 0,1 \dots 0,14$ для эжекционной; $a_N = 3$ для вентиляторной и $a_N = 2$ для эжекционной систем охлаждения.

Если из эффективной мощности вычесть мощность потерь, получим свободную мощность, которая поступает на вход трансмиссии (силовой передачи): $N_{ce} = N_e - \Delta N$. Свободный крутящий момент: $M_{ce} = N_{ce} / \omega$.

Логично ввести коэффициенты приспособляемости, которые выделяют характеристики свободных мощности и момента двигателя.

Коэффициент приспособляемости двигателя по угловой скорости (свободный) – это отношение угловой скорости при максимальной свободной мощности (как правило, максимум свободной мощности имеет место при угловой скорости ω_N) к угловой скорости при максимальном свободном крутящем моменте. Нетрудно показать, что последняя

$$\omega_{M_{ce}} = \frac{\omega_N [b_\omega - a_\Delta (3 - a_N)]}{2 [c_\omega + a_\Delta (a_N - 2)]}. \quad (8)$$

Тогда коэффициент приспособляемости двигателя по угловой скорости (свободный) равен

$$k_{\omega_{ce}} = \frac{\omega_N}{\omega_{M_{ce}}} = \frac{2 [c_\omega + a_\Delta (a_N - 2)]}{b_\omega - a_\Delta (3 - a_N)}. \quad (9)$$

Коэффициент приспособляемости по свободному крутящему моменту - отношение максимального свободного крутящего момента к свободному крутящему моменту при максимальной мощности. После несложных преобразований получим:

$$k_{M_{ce}} = \frac{a_\omega + \frac{b_\omega - a_\Delta (3 - a_N)}{2 \cdot k_{\omega_{ce}}}}{1 - a_\Delta}. \quad (10)$$

В таблице приведены параметры широкого спектра дизельных двигателей ГКМ.

Таблица

Марка (страна-разрабочик)	Тип	$N_{e_{max}}$, кВт (л.с.)	ω_N , рад/с (об/мин)	$M_{e_{max}}$, Нм (кгс·м)	ω_{M_e} , рад/с (об/мин)	$\frac{k_{M_e}}{k_{M_{ce}}}$	$\frac{k_{\omega_e}}{k_{\omega_{ce}}}$	a_ω	b_ω	c_ω	Модель ГКМ, где установлен дизель
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ЯМЗ-236 (СССР)	V6	132 (180)	220 (2100)	667 (68)	157 (1500)	$\frac{1,11}{1,22}$	$\frac{1,4}{1,55}$	0,42	1,94	1,36	МАЗ-500
КамАЗ-740 (СССР)	V8	155 (210)	272 (2600)	638 (65)	168 (1600)	$\frac{1,12}{1,25}$	$\frac{1,62}{1,9}$	0,81	1,01	0,82	КамАЗ-4310, Урал-4320
В-6 (СССР)	P6	177 (240)	188 (1800)	1128 (115)	126 (1200)	$\frac{1,2}{1,33}$	$\frac{1,49}{1,61}$	0,38	2,44	1,82	ПТ-76
ЯМЗ-238 (СССР)	V8	177 (240)	220 (2100)	883 (90)	157 (1500)	$\frac{1,1}{1,2}$	$\frac{1,4}{1,57}$	0,49	1,7	1,19	МТ-Л, МТ-ЛБ, КрАЗ-255Б, БТР-80

Продолжение таблицы

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
КамАЗ-7403 (СССР)	V8	191 (260)	272 (2600)	780 (80)	183 (1750)	$\frac{1,11}{1,23}$	$\frac{1,49}{1,69}$	0,64	1,39	1,03	БТР-80, БРДМ-3
ЯМЗ-238С (СССР)	V8	195 (265)	240 (2300)	883 (90)	157 (1500)	$\frac{1,09}{1,21}$	$\frac{1,53}{1,82}$	0,78	0,95	0,73	Урал-5322
ЗТД-1 ¹ (Украина)	V3	206 (280)	272 (2600)	873 (89)	215 (2050)	$\frac{1,15}{1,21}$	$\frac{1,27}{1,30}$	- 1,02	5,5	3,48	БТР-70 (модернизация)
ЯМЗ-238Н (СССР)	V8	221 (300)	220 (2100)	1079 (110)	157 (1500)	$\frac{1,07}{1,17}$	$\frac{1,4}{1,62}$	0,61	1,29	0,9	КрАЗ-260, МТ-ЛБу
УТД-20С1 (СССР)	V6	221 (300)	272 (2600)	960 (98)	162 (1550)	$\frac{1,18}{1,32}$	$\frac{1,68}{1,89}$	0,79	1,32	1,11	БМП-2, БТР-3Е
ЯМЗ-240 (СССР)	V12	265 (360)	220 (2100)	1275 (130)	157 (1500)	$\frac{1,06}{1,16}$	$\frac{1,4}{1,68}$	0,7	1,02	0,72	МАЗ-538
ЗТД-2 ¹ (Украина)	V3	294 (400)	272 (2600)	1177 (120)	215 (2050)	$\frac{1,09}{1,14}$	$\frac{1,27}{1,32}$	- 0,18	3,2	2,02	БМП-2 (модернизация)
ЯМЗ-240Н1 (СССР)	V12	368 (500)	220 (2100)	1765 (180)	168 (1600)	$\frac{1,06}{1,14}$	$\frac{1,31}{1,5}$	0,48	1,51	0,99	БелАЗ-548А
ЗТД-3 ¹ (Украина)	V3	368 (500)	272 (2600)	1462 (149)	215 (2050)	$\frac{1,08}{1,13}$	$\frac{1,27}{1,33}$	- 0,07	2,9	0,83	М-113 (модернизация)
УТД-29 (СССР)	V10	368 (500)	272 (2600)	1600 (163)	162 (1550)	$\frac{1,18}{1,32}$	$\frac{1,68}{1,89}$	0,79	1,32	1,11	БМП-3
Д-12А-525А (СССР)	V12	386 (525)	210 (2000)	2206 (225)	126 (1200)	$\frac{1,2}{1,34}$	$\frac{1,67}{1,85}$	0,75	1,52	1,27	МАЗ-537Г, МАЗ-543, МАЗ-7310
В-55 (СССР)	V12	427 (580)	210 (2000)	2354 (240)	126 (1200)	$\frac{1,16}{1,29}$	$\frac{1,67}{1,9}$	0,8	1,18	0,98	Т-55

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ЗТД-4 ¹ (Украина)	В3	442 (600)	272 (2600)	1755 (179)	215 (2050)	$\frac{1,08}{1,13}$	$\frac{1,27}{1,33}$	- 0,06	2,88	1,82	БМП-3 (модернизация)
Д-12АН-650 (СССР)	В12	478 (650)	210 (2000)	2650 (270)	126 (1200)	$\frac{1,16}{1,3}$	$\frac{1,67}{1,89}$	0,79	1,23	1,02	Шасси 12x12
5ТДФ ^{1,2} (СССР)	В5	515 (700)	293 (2800)	1923 (196)	215 (2050)	$\frac{1,09}{1,16}$	$\frac{1,36}{1,47}$	0,39	1,93	1,32	Т-64
В-46-4 (СССР)	В12	523 (710)	210 (2000)	2814 (287)	141 (1350)	$\frac{1,13}{1,25}$	$\frac{1,49}{1,66}$	0,59	1,62	1,21	МТ-Т, МТ-С
В-46-6 (СССР)	В12	574 (780)	210 (2000)	3090 (315)	141 (1350)	$\frac{1,13}{1,25}$	$\frac{1,49}{1,66}$	0,59	1,62	1,21	Т-72
В-84МС (Россия)	В12	618 (840)	210 (2000)	3335 (340)	141 (1350)	$\frac{1,13}{1,25}$	$\frac{1,49}{1,66}$	0,59	1,62	1,21	Т-72Б, Т-90
5ТДФ М ^{1,2} (Украина)	В5	625 (850)	293 (2800)	2325 (237)	215 (2050)	$\frac{1,09}{1,15}$	$\frac{1,36}{1,47}$	0,41	1,86	1,27	Т-64БМ1
В-92С2 (Россия)	В12	736 (1000)	210 (2000)	4067 (415)	152 (1450)	$\frac{1,16}{1,27}$	$\frac{1,38}{1,47}$	0,06	3,04	2,1	Т-90С
5ТДФ МА ^{1,2} (Украина)	В5	736 (1000) $N_{en} =$ ≈ 693 (940 ³)	272 (2600) $\omega_n \approx 293$ (2800 ³)	2787 (284)	215 (2050)	$\frac{1,03}{1,09}$ $\frac{(1,12^3)}{(1,18^3)}$	$\frac{1,27}{1,36}$ $\frac{(1,36^3)}{(1,47^3)}$	- 0,35	3,7	2,35	Перспективная ГМ
6ТД-1 ^{1,2} (СССР)	В6	736 (1000)	293 (2800)	2746 (280)	215 (2050)	$\frac{1,09}{1,16}$	$\frac{1,36}{1,47}$	0,39	1,93	1,32	Т-64БМ, Т-80УД

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
6ТД-2 ^{1,2} (Украина)	В6	883 (1200) $N_{en} =$ $=832$ (1130 ³)	272 (2600) $\omega_n = 293$ (2800 ³)	3340 (341)	215 (2050)	$\frac{1,03}{1,09}$ $\frac{(1,12^3)}{(1,18^3)}$	$\frac{1,27}{1,36}$ $\frac{(1,36^3)}{(1,47^3)}$	- 0,35	3,7	2,35	Т-84, Т-72АГ
6ТД-3 ^{1,2} (Украина)	В6	993 (1350)	293 (2800)	3924 (400)	210 (2000)	$\frac{1,16}{1,23}$	$\frac{1,4}{1,47}$	0,15	2,82	1,97	Перспек тивная ГМ
Опыт ный ^{1,2} (Украина)	В6	1176 (1600)	257 (2450)	4988 (508)	173 (1650)	$\frac{1,09}{1,16}$	$\frac{1,49}{1,69}$	0,71	1,13	1,84	Перспек тивная ГМ

В колонке "Тип" цифрой обозначено число цилиндров, буквой: Р – рядный, V – V-образный, В – со встречным движением поршней; ¹ – двухтактный дизель; при расчете $k_{\omega_{ce}}$ и $k_{M_{ce}}$ принято $a_{\Delta} = 0,14$, $a_N = 3$, кроме двигателей отмеченных ², для которых $a_N = 2$; ³ – для дизелей используется и зона внешней характеристики, где $N_e < N_{e_{max}}$, а $\omega > \omega_N$ (N_{en} и ω_n – номинальные эффективная мощность и угловая скорость). В этом случае при $\omega = \omega_N$ должно выполняться как условие (6) так и $dN_e / d\omega = 0$. Последнее условие применительно к (1) дает: $a_{\omega} + 2b_{\omega} - 3c_{\omega} = 0$. Тогда $c_{\omega} = k_{\omega_e} / 2(k_{\omega} - 1)$; $b_{\omega} = 2c_{\omega} - 1$; $a_{\omega} = 2 - c_{\omega}$.

Представленные результаты позволяют аппроксимировать характеристики энергетических установок с учетом объектовых потерь мощности в виде, удобном для последующего анализа тягово-динамических качеств транспортных средств.

Список литературы: 1. Андрусенко П.И., Бурцев О.Н., Гутаревич Ю.Ф. Характеристики автомобильных и тракторных двигателей. – К.: Вища шк., 1978. – 128 с. 2. Машиностроение. Энциклопедия в 40-а т. - Т.4-15: Колесные и гусеничные машины / Под общ. ред. В.Ф. Платонова. – М.: Машиностроение, 1997. – 688 с. 3. Чобиток В.А. Теория движения танков и БМП. – М.: Воениздат, 1984. – 264 с. 4. Кошарний М.Ф. Основы механики та енергетики автомобіля. – К.: Вища шк., 1992. – 200 с. 5. Литвинов А.С., Фаробин Я.Е. Автомобиль: Теория эксплуатационных свойств. – М.: Машиностроение, 1989. – 240 с. 6. Забавников Н.А. Основы теории транспортных гусеничных машин. – М.: Машиностроение, 1975. – 448 с. 7. Павлов В.В. Тягово-скоростные свойства транспортных машин. Теория и расчет. – М.: МАДИ, 1991 – 191 с.

Поступила в редколлегию 15.06.07